

偏心クラッド棒・線材の引抜き加工・2

Drawing of Eccentric Clad Rods and Wires · 2

木 内 学*・徐 瑞 坤*

Manabu KIUCHI and Ray-Quen HSU

1. はじめに

一般に、複合クラッド材は、構成材料の変形抵抗その他の機械的特性が違うために、押し出し・引抜き加工の際に、しわや破断等の欠陥が生じやすく、安定した加工を行うことが難しい場合が多い。従来、クラッド材の押し出し・引抜き加工については、種々の角度から研究がなされてきた^{1)~4)}が、これらの研究は、すべて軸対称クラッド材を対象としており、非軸対称のクラッド材の加工問題については、これまで、ほとんど研究されていないのが実状である。

前報⁵⁾で、筆者らは、偏心クラッド棒・線材の押し出し・引抜き加工を対象とし、加工力や製品の形状・寸法等を一般的に解析可能な手法を提案し、それを用いて、幾つかの計算事例を示した。本報では、この解析モデルをさらに拡張し改良して、押し出し・引抜き加工時の芯材あるいはスリーブ材の加工限界の判定条件を設定し、それを用いて、偏心単芯あるいは多芯クラッド材の加工限界、および製品の形状・寸法、すなわち芯材の断面積比や位置の変化について、系統的に検討した結果について報告する。

2. 三次元的可容速度場および解析モデル

非軸対称押し出し・引抜き加工時のダイス内の素材の流動は、長手方向軸まわりの回転速度成分を有するために、一般にその動的可容速度場の定式化が困難であるとされてきたが、木内ら⁶⁾は、異形材の押し出し・引抜き加工に関する汎用性の高い三次元的可容速度場の開発に成功し、種々の場合について解析を行い、多くの成果を得てきた。本研究では、上述の三次元的可容速度場をさらに拡張し複合化して、偏心クラッド材の押し出し・引抜き加工の解析に適用した⁷⁾。速度場の構成に関する詳細な条件、芯材、スリーブ材内部の各方向の速度成分の定式化ならびに加工に要する各仕事率の計算式は前報に示したので、ここでは省略する。

2.1 解析モデル

クラッド材の押し出し・引抜き加工は、大別して、(1)加工前に芯材とスリーブ材が接合されている場合、(2)両者が接合されていない場合、とに分けられる。本研究では、当面、芯材とスリーブ材が加工前に接合されていない場合を対象として解析を進める。それゆえ、ダイス入口において、芯材、スリーブ材はそれぞれ異なる流入速度を持つことが許される。クラッド材の、理想的な引抜きまたは押し出し加工の場合として、スリーブ材と芯材とが同一の加工率(同一の減面率)を受ける場合が考えられる。しかしながら実際には、芯材とスリーブ材の変形抵抗が異なるために、加工後の製品の芯材の断面積比や偏心率は、素材のそれと一致するとは限らない。そのような場合の不均一変形を表すために、押し出し・引抜き加工の際に発生する芯材の断面積比と偏心率の変化を表すパラメータ ϵ , δ を導入し、次式を定義する。

$$(R_{cf}/R_f)^2 = (1 + \epsilon)(R_{co}/R_o)^2 \quad (1)$$

$$r_{af}/R_f = (1 + \delta)(r_{ai}/R_o) \quad (2)$$

ここで、 R_{co} , R_{cf} はそれぞれ素材と製品の芯材半径、 r_{ai} と r_{af} は素材と製品の中心から見た芯材中心までの偏心量、 R_o , R_f はダイスの入口と出口半径である(図1参照)。パラメータ ϵ , δ がともに零の時、クラッド材は芯材・スリーブ材共に同一の加工率を受ける場合を表す。 ϵ , δ が正または負の場合は、芯材の減面率の増または減、あるいは、芯材の偏心率の増または減に対応する。ダイス面およびスリーブ材と芯材との間の境界面を表

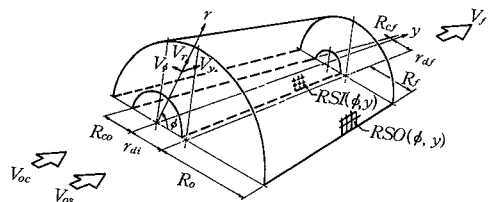


図1 一般化解析モデル

*東京大学生産技術研究所 第2部

す形状関数 $RSO(\phi, y)$ と $RSI(\phi, y)$ が幾何学的に与えられれば、上述の一般化動的可容速度場を用いることにより、すべての速度成分、さらにはひずみ速度成分が計算できる。加工に要する全仕事率 J^* は、芯材のダイス出口での半径 (R_{co})、芯材のダイス出口での偏心率 (r_{di}) 等を準独立変数として最小化され、これらを通して各加工因子が芯材の偏心率や断面積比に与える影響が解析可能になる。

2.2 芯材、スリーブ材の加工限界の判定条件

クラッド材(複合材料)の加工限界、すなわち、スリーブ材あるいは芯材の不安定変形の開始限、あるいは破断限界の解析的予測は容易ではない。この問題については、種々の考え方が提案されている^{11,12)}が、本研究では、非軸対称クラッド材の引抜き加工の加工限界の判定基準の一つとして、単純に、芯材、スリーブ材のダイス出口における平均引抜き応力をそれぞれ計算し、それらとそれぞれの材料の変形抵抗を比較することによって、クラッド材が安定的に引抜き可能か否かを判定することを試みた。すなわち、ダイス出口において芯材、スリーブ材に作用する引抜き応力 (σ_{fc} または σ_{fs}) がそれらの材料固有の変形抵抗値より大きい場合、不安定変形が始まると判定し、

加工不能と判断することとした。もちろん、逆の場合には、安定した引抜き加工ができるものと考えられる。

(1) $\epsilon \geq 0$ の場合 全仕事率の最小化によって得られた準独立変数 ϵ の最適値が零より大きい場合、すなわち、芯材がスリーブ材より変形しにくい場合には、図 2 に示すように、ダイス内において、芯材の長手方向速度がスリーブ材のそれより大きく、変形中の芯材は界面を介してスリーブ材により後方へ引っぱられる。その場合、ダイス出口での芯材、スリーブ材に加わる引抜き応力は次のように計算されるものとする。

$$\sigma_{fc} = (\dot{W}_{ic} + \dot{W}_s + \sigma_b \pi R_{co}^2 V_{oc}) / \pi R_{co}^2 V_f \quad (3)$$

$$\sigma_{fs} = [\dot{W}_{is} + \dot{W}_f + \sigma_b \pi (R_{co}^2 - R_{co}^2) V_{os}] / \pi (R_{co}^2 - R_{co}^2) V_f \quad (4)$$

ただし、 σ_{fc} は芯材、 σ_{fs} はスリーブ材の引抜き応力、

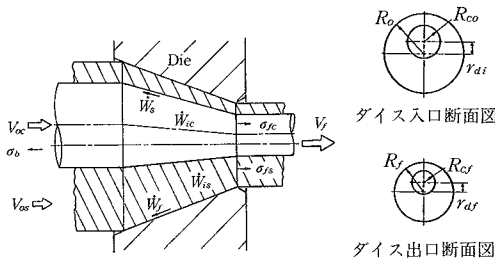
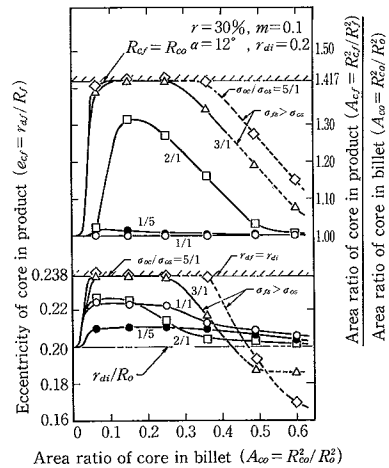
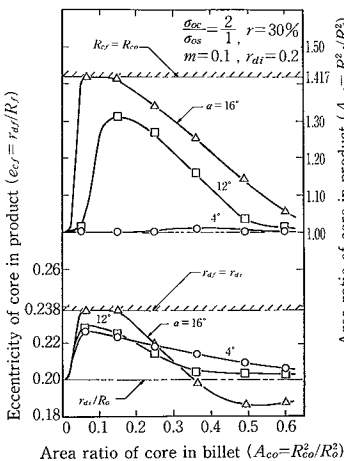


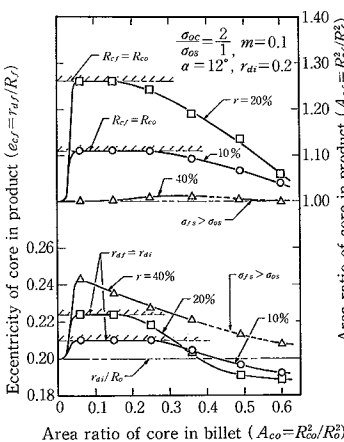
図 2 クラッド材の変形に消費される仕事率



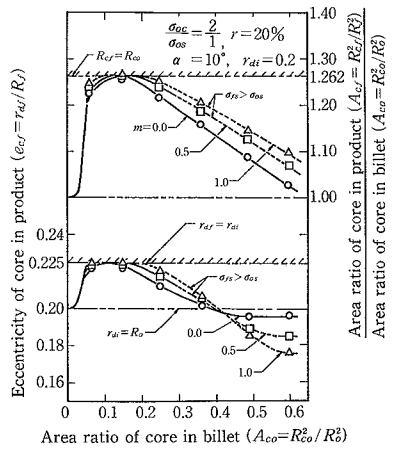
(a) 変形抵抗による影響



(b) ダイス半角による影響



(c) リダクションによる影響



(d) まさつ定数による影響

図 3 各加工条件が製品形状に及ぼす影響

研究速報
 \dot{W}_{ic} , \dot{W}_{is} はそれぞれ芯材とスリーブ材の内部変形仕事率, \dot{W}_s は両材料境界面でのせん断仕事率, \dot{W}_f は摩擦仕事率, σ_b は後方引張り応力である。ここで, 芯材とスリーブ材との界面におけるせん断仕事率 \dot{W}_s は, 全部芯材側の変形に消費されるものとする。ただしこのようにして求めた σ_{fc} , σ_{fs} は, 実際の値より高い値であると考えられ, 実加工より厳しい加工可能条件を与えよう。

(2) $\epsilon < 0$ の場合 この場合のダイス出口での引抜き応力は, 上と同様な考察から, 次式で与えられるものとする。

$$\sigma_{fs} = \left[\dot{W}_{is} + \dot{W}_s + \dot{W}_f + \sigma_b \pi (R_c^2 - R_{co}^2) V_{os} \right] / \pi (R_f^2 - R_{co}^2) V_f \quad (5)$$

$$\sigma_{fc} = (\dot{W}_{ic} + \sigma_b \pi R_{co}^2 V_{oc}) / \pi R_{cf}^2 V_f \quad (6)$$

3. 解析結果

3.1 各加工因子が製品形状に及ぼす影響

図3-(a)~(d)に, 芯材とスリーブ材の変形抵抗比 (σ_{oc}/σ_{os}), ダイス半角, リダクション, 摩擦定数などの因子が, 製品の芯材の偏心率, および, 素材が製品へと加工される過程で発生する芯材の断面積比の変化, に与える影響について調べた結果を示す。なお, 各図において, 横軸には素材の芯材の断面積比 ($A_{co} = R_{co}^2/R_f^2$), 縦

軸には製品の芯材の偏心率 ($e_{cf} = r_{df}/R_f$), および, 素材と製品の芯材の断面積比 (A_{cf}/A_{co} , $A_{cf} = R_{cf}^2/R_f^2$) の変化, を表す。各図中, 破線で示した範囲は, スリーブ材が不安定(破断)限界を越える場合を意味する。これらの解析結果より, 次のことが言える。

- (1) 一般に, ダイス半角および摩擦抵抗を小さくしたほうが, 芯材とスリーブ材の均一な加工率を得やすい。
- (2) 芯材の変形抵抗値がスリーブ材のそれより高い場合には (図3-(c)), リダクションが小さい範囲 (red. \leq 約30%) において, 芯材の断面積比はリダクションの増加と共に大きくなる傾向がある。
- (3) リダクションが30%よりさらに増大すると, 芯材とスリーブ材の断面積比の変化は再び小さくなっていくが, その際, 後述するように, スリーブ材の平均引抜き応力がスリーブ材の持つ変形抵抗値よりも大きくなり安定した加工が不能となる場合がある。

3.2 各加工因子が加工限界に及ぼす影響

図4-(a)~(d)に, 芯材とスリーブ材の変形抵抗比, ダイス半角, 摩擦定数, および芯材の初期偏心率 ($e_{co} = r_{di}/R_o$) が, スリーブ材の不安定(破断)限界に与える影響を示す。図より, (1)変形抵抗比 (σ_{oc}/σ_{os}), ダイス半角, 摩擦定数が大きいほど, 安定かつ健全な引抜き加工ができる範囲は狭くなる, (2)芯材の初期断面積比 A_{co} の増加につれて, 安定な引抜き加工ができるリダクションの範囲は小さくなる, (3) A_{co} が5%~30%の範囲では, 芯材は変形しなくなる, (4)図4-(d)より, 偏心しているクラッド材は, 軸対称クラッド材の場合より広い加工条件範囲において, 安定かつ健全な引抜き加工ができる, ことなどがわかる。

3.3 製品形状の予測

加工前に, 接合していないクラッド棒・線材の引抜き加工に関しては, リダクションを変化させると, スリーブ材が不安定変形または破断する加工条件のほか, 芯

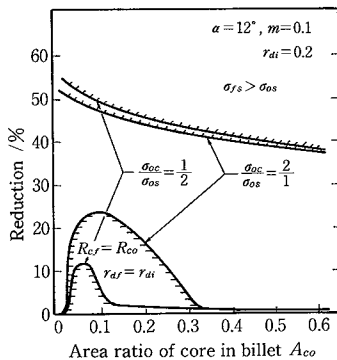
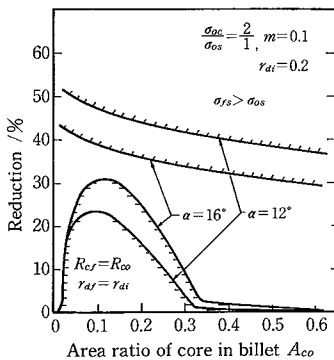
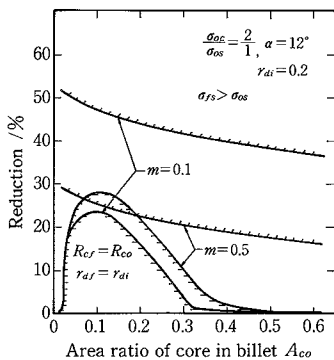


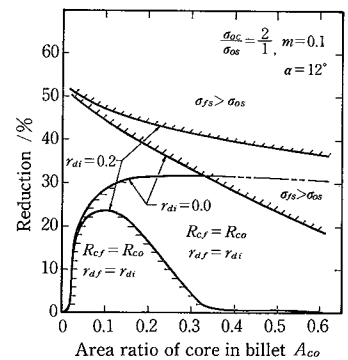
図4 (a)変形抵抗比による影響



(b)ダイス半角による影響



(c)まさつ定数による影響



(d)芯材の初期偏心率による影響

図4 各加工条件因子がクラッド材の不安定変形限界に及ぼす影響

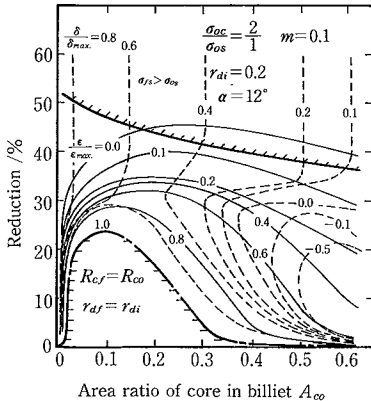


図5 (a) 非軸対称クラッド材の形状等高線図

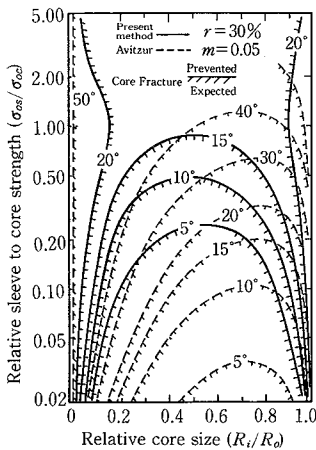


図6 ダイス半角が芯材破断限界に及ぼす影響

材が変形しなくなる加工条件の範囲が存在する。両加工条件にはさまれた範囲では、健全な加工ができると考えられるが、その場合であっても製品の芯材の断面積比と偏心率は、加工条件により変化する。このような製品の形状、寸法の変化を表すために、図5のようなパラメータ ϵ および δ に関する等高線図を用いることができる。なお、図で ϵ_{max} 、 δ_{max} は、芯材が変形しない場合（すなわち、 $R_{cf} = R_{co}$ 、かつ、 $r_{df} = r_{di}$ ）に対応する ϵ 、 δ の値である。このような図から、与えられた加工条件の下で得られる製品の形状・寸法を予測することが可能となる。

3.4 軸対称クラッド材に関する解析結果との比較

本解析モデルは、非軸対称クラッド材の押し出し・引抜き加工の解析のために開発されたが、軸対称の場合、また加工前の芯材・スリーブ材が接合されている場合の加工にも適用できる。そこで、Avitzur⁴⁾が解析した事例、すなわち加工前に接合されている同心クラッド材の引抜き加工と同じ場合について、本解析モデルを適用して加

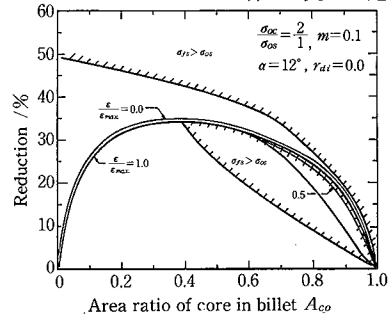


図5 (b) 軸対称クラッド材の形状等高線図

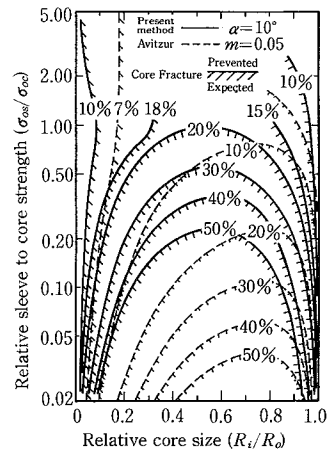


図7 リダクションが芯材破断限界に及ぼす影響

工限界の推定を行った。両者の計算結果を比較して、図6、7に示す。図より、本解析モデルで得られた健全な加工条件範囲は、Avitzurの解析手法による結果より狭いことが判明した。

4. ま と め

非軸対称複合クラッド材の押し出し・引抜き加工の解析手法を提案し、各加工条件因子が製品の形状、寸法および加工限界に与える影響を検討した。また、このモデルを軸対称クラッド材の引抜き加工に適用し、健全な製品を得るのに要する加工条件としては従来の解析結果と比較して、やや厳しい加工条件が得られることを見いだした。
(1988年6月28日受理)

参 考 文 献

- 1) Osakada, K., et al: Int. J. Mech. Sci., 15 (1973), 291.
- 2) 松浦・高瀬・塑性と加工, 15-157 (1974), 156.
- 3) 山口ほか: 塑性と加工, 15-164 (1974), 723.
- 4) Avitzur, B., et al: Trans. ASME, J. Eng. Ind., 108-2 (1986), 133.
- 5) 木内・徐: 第38回塑加工連講論, (1987), 253.
- 6) 木内・岸・石川: 塑性と加工, 24-266 (1983), 290.